第47卷 第10期
2024年10月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 10
Oct. 2024

石羊河流域生态系统服务相互作用的时空变化及驱动机制研究

胡飞鹏， 赵 军， 孙紫云， 刘 坚， 托 瑞

（西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：了解生态系统服务的时空变化及其内部复杂关系对管理生态系统服务是至关重要的。以石羊河流域为研究区，评估流域2010、2015年和2020年6种生态系统服务，分析栅格和乡镇尺度上生态系统服务权衡协同及生态系统服务簇的时空变化，利用增强回归树模型探讨研究区生态系统服务簇的驱动机制。结果表明：(1) 各类服务空间分异明显，产水量、碳储量、土壤保持和生境质量呈“西南高–东北低”的空间格局，粮食供应主要集中于流域中部和北部的耕地区，休闲娱乐高值区分布于流域南部及中部和北部人口密集地区；研究期间内各类服务均有不同程度提高，其中土壤保持的增幅最大，碳储量和生境质量增幅较小。(2) 2个尺度上生态系统服务权衡协同作用呈相似性，但权衡协同作用强度不同，总体上表现为12对协同关系，3对权衡关系。(3) 2个尺度上生态系统服务簇的空间格局相似，流域南部分布除粮食供应外其他5种服务为主的服务簇，流域中部和北部民勤绿洲地区分布与粮食供应和休闲娱乐为主的服务簇，其他地区的生态环境相对恶劣，分布其中的服务簇内各项服务供应较低；研究期间内服务簇存在明显的空间和数量转移变化。(4) 多种因素在研究区生态系统服务簇的变化中起着重要作用，影响因子在不同年份的影响程度略不相同，其中土地利用类型、归一化植被指数、年降水量和海拔是生态系统服务簇变化的重要驱动因子。

关 键 词：生态系统服务簇；权衡协同；增强回归树模型；石羊河流域

文章编号：1000－6060(2024)10－1755－12(1755～1766)

生态系统服务(Ecosystem service，ES)指人类直接或者间接地从生态系统中获取的各种惠益，分为支持服务、供给服务、调节服务和文化服务4种类型[1-2]。千年生态系统服务评估指出，全球多种生态系统正面临着退化和破坏，导致ES之间关系的变化，这些变化直接影响到人类的福祉[3]。因此，厘清各类ES及其复杂的相互关系，对促进ES的合理利用和提高人类福祉是至关重要的。

正确认识各类ES之间的复杂关系是实现生态系统可持续管理的前提[4]。由于ES的多样性、空间分布的不均衡性以及人类使用的选择性，在多种因素作用下，ES之间的关系出现了此消彼长、相互增益等变化[5]。这种此消彼长、相互增益的关系被定义为权衡协同(Trade-offs and synergies，TOSs)。目前，国内外对TOSs的研究已取得相当丰硕的成果，同时涌现出大量的研究方法，包括统计学方法[6-7]、空间分析方法[8]、情景模拟分析方法[9]和服务流动性方法[10]等。针对TOSs难以深入揭示ES之间的复杂关系，为深入理解ES之间相互依存关系，生态系统服务簇(Ecosystem service bundle，ESB)作为一种可行的定量视角被提出[11]。ESB指共现于某一时空尺度下多类ES的组合，反映了ES之间的相互依赖性[12]。ESB的研究可以比较全面地评估和理解某一区域内生态系统对人类社会的价值和贡献，还有助于综合考虑不同ES之间的相互作用，为决策者提供更全面的参考信息。随着研究的深入，ESB的识别方

收稿日期：2023-12-15； **修订日期**：2024-01-28
基金项目：国家自然科学基金项目(42161072)资助
作者简介：胡飞鹏(1999-)，男，硕士研究生，主要从事环境遥感和GIS应用研究. E-mail: 2022212994@nwnu.edu.cn
通讯作者：赵军(1963-)，男，博士，教授，主要从事环境遥感和GIS应用研究. E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

法也逐渐成熟，常见方法有聚类算法[13]、主成分分析[14]、神经网络[15]等。在ESB变化及其驱动因素研究方面，已有成果利用随机森林算法进行评估[16]。在不同尺度上ES的供给和特征会发生变化，ES间的相互作用也会发生变化，目前已有学者从不同尺度对ES进行研究，揭示其内部复杂关系，但对乡镇尺度上ES之间复杂关系的研究还比较少。在乡镇尺度上开展ES研究，可以更好地揭示乡镇尺度上ES之间的关联和相互作用，满足乡镇具体问题的需求。

石羊河流域是典型的干旱内陆河流域，被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠包围，生态环境极为脆弱、敏感[17]。本文以石羊河流域为例，在量化多类ES的基础上使用Pearson相关系数法分析栅格和乡镇尺度上TOSs的时空变化，同时利用自组织映射识别2个尺度上ESB的时空分布，并结合增强回归树模型探究ESB变化的驱动机制，进而深入认识石羊河流域ES的复杂关系的时空变化，为当地的生态管理和人类福祉改善提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

石羊河流域位于河西走廊东部(101°22′~104°16′E，36°29′~39°27′N)，总面积为4.16×10^4 km^2，地势南高北低，自西南向东北倾斜，海拔最高处为5231 m，位于南部祁连山区，海拔最低处为1202 m，位于北部低山丘陵区(图1)。整个流域位于中国西北干旱半干旱地区，是典型的温带大陆性干旱气候，日照充足，昼夜温差大，降雨量少且集中。南部祁连山区为高寒半干旱湿润区，年降水量300~600 mm，年蒸散发700~1200 mm；中部河西走廊平原为干旱区，降水量150~300 mm，年蒸散发量1300~2000 mm；北部低山丘陵地区，年降水量小于150 mm，年蒸发量2000~2600 mm。

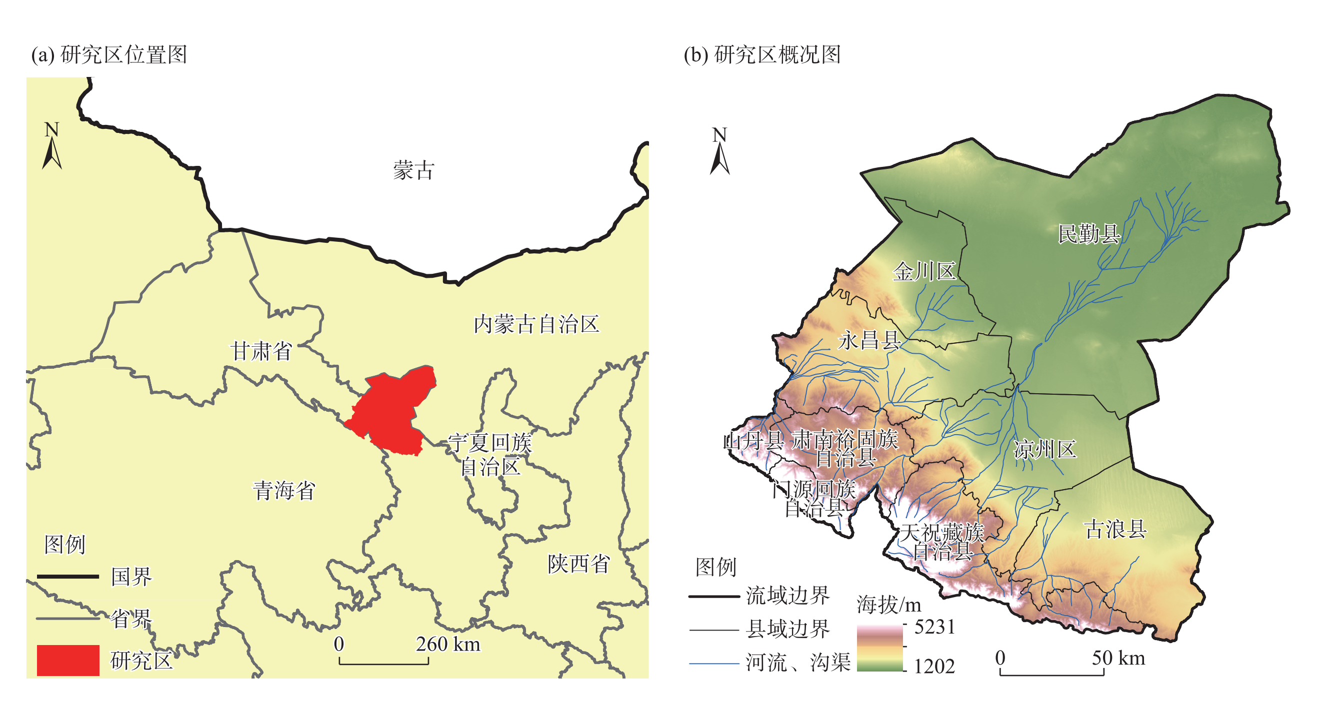
1.2 数据来源

本文使用的数据包括土地利用数据、气象数据、土壤数据、地形数据、社会经济数据等，将各数据统一到Albers投影下，并重采样至1 km，具体数据来源和说明见表1。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务的定量评估 本文选取石羊河流域粮食供应、产水量、碳储量、土壤保持、生境质量及休闲娱乐6种主要的ES，具体计算方法见表2。

1.3.2 生态系统服务权衡协同关系分析 本文采用Pearson相关系数法分析栅格(1 km)和乡镇尺度下各类服务间TOSs关系，其中正相关则为协同关系，负相关表示为权衡关系，服务间相关系数的绝对值越大，TOSs作用越强，反之则亦然。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of research region

表1　数据来源及其说明

Tab. 1　Data source and data explanations

数据	数据描述	分辨率	数据来源
土地利用数据	2010、2015、2020年三期土地利用数据	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/）
气象数据	2010—2020年潜在蒸散发数据、年降水量和年均气温数据	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/）
土壤数据	基于世界土壤数据库的泛第三极土壤数据库	1 km	国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/）
地形数据	DEM	30 m	地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）
社会经济数据	GDP	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/）
	人口密度数据	100 m	WorldPOP（https://hub.worldpop.org/）
	2010—2020年甘肃粮食生产统计数据		甘肃省统计局（http://tjj.gansu.gov.cn/）
其他数据	2010—2020年NDVI和NPP数据	30 m	国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/）
	县域和乡镇边界；河流水系数据		国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/）
	交通道路数据，包括公路、铁路等		OSM(https://openmapt.org/)

注：DEM为数字高程模型；GDP为国内生产总值；NDVI为归一化植被指数；NPP为净初级生产力。

表2　生态系统服务评估方法

Tab. 2　Assessment methods for ecosystem services

生态系统服务		计算公式	描述
供应服务	粮食供应	$G_x = \left(\frac{\mathrm{NDVI}_x}{\mathrm{NDVI}_{\mathrm{sum}}}\right) \times G_{\mathrm{sum}}$	根据以往研究，粮食总产量按照耕地NDVI值与耕地总NDVI值的比值进行分配，以此确定研究区内各栅格的粮食供应能力[18]。G_x为栅格x的粮食供应量（t）；NDVI_x为耕地栅格x的NDVI值；$\mathrm{NDVI}_{\mathrm{sum}}$为研究区内所有耕地的NDVI总和；$G_{\mathrm{sum}}$为研究区内耕地内的粮食总产量（t）。
	产水量	$Y_x = \left(1 - \frac{\mathrm{AET}_x}{P_x}\right) \times P_x$	利用InVEST模型中的Water yield模块对水源供给进行计算，模型中的参数根据有关研究成果确定[19]。Y_x为栅格x的年产量（mm）；P_x和AET_x分别为栅格x的年降雨量和年实际蒸散量（mm）。
调节服务	碳储量	$C_x = C_{\mathrm{above}} + C_{\mathrm{below}} + C_{\mathrm{soil}} + C_{\mathrm{dead}}$	利用InVEST模型中的Carbon Storage Sequestration模块计算固碳储量，碳库参数根据有关研究成果确定[20]。C_x为总碳储量（t·hm^{-2}）；C_{above}为地上碳储量（t·hm^{-2}）；C_{below}为地下碳储量（t·hm^{-2}）；C_{dead}为死亡有机质（t·hm^{-2}）；C_{soil}为土壤碳储量（t·hm^{-2}）。
	土壤保持	$\mathrm{SC} = R \times K \times \mathrm{LS} \times P \times (1 - C)$	采用修正水土流失方程估算土壤保持[21]。SC为土壤保持量（t·hm^{-2}·a^{-1}）；R为降雨侵蚀力因子；K为土壤可侵蚀力因子；LS为坡度坡长因子；C为植被覆盖因子；P为土壤保持因子。
支持服务	生境质量	$Q_{xj} = H_j\left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z}\right)$	利用InVEST模型中Habitat Quality模块计算生境分布和退化情况[22]。Q_{xj}为第j类土地利用类型栅格x的生境质量指数；H_j为土地利用类型j的生境适宜度；D_{xj}为土地利用类型j中的栅格单元x的生境退化程度；k为半饱和系数。其中威胁因子及其敏感度的赋值参照相关研究成果确定[19]。
文化服务	休闲娱乐	$\mathrm{RS}=\Sigma(\mathrm{NPP}_i+\mathrm{POP}_i+\mathrm{ROAD}_i)$	文化服务指人类直接或间接从生态系统中所获得的非物质性收益。基于森林游憩服务量化模型，引入NPP取代娱乐得分，对流域的休闲娱乐进行评估[23-24]。根据公式对得分求和后重分类为0~10，得分越高，休闲娱乐服务越强。RS为休闲娱乐的总得分；NPP_i为植被净初级生产力水平得分；POP_i为人口聚集临近度得分；ROAD_i为道路的距离得分。

1.3.3　生态系统服务簇的识别　本文采用自组织映射（SOM）实现栅格（1 km）和乡镇尺度下ESB的识别，与传统的聚类算法相比，SOM的优势在于其具有较强的记忆力、鲁棒性和非线性映射等特征，能够将分类结果进行可视化[25]。

1.3.4　生态系统服务簇的驱动力分析　本文采用增强回归树模型（BRT）定量分析不同的影响因子对石羊河流域ESB的影响机制[26-27]。通过网格搜索法和五折交叉验证来确定模型的最优参数，树数以步长为1000从5000增加到10000，学习率以步长为0.001从0.001增加到0.01，树复杂度以步长1从3增加到6，每次抽取70%的数据进行训练，剩下的30%作为结果验证，根据均方根误差和R^2，选择最优参数构建模型。根据以往的相关研究选取10个影响因子[16,28-29]，包括土地利用类型、归一化植被指数、降水量、年平均气温、潜在蒸散发、海拔、坡度、土壤类型、人口密度和国内生产总值，利用LASSO回归算法筛选出8个重要因子，分别为土地利用类型、归一化植被指数、降水量、潜在蒸散发、海拔、土壤类型、人口密度和国内生产总值。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务的时空分布

石羊河流域各类ES时空分布格局存在明显差异(图2)。产水量、碳储量、土壤保持和生境质量等4种ES由西南向东北逐渐递减,粮食供应主要分布在流域中部和北部民勤绿洲的耕地区;休闲娱乐高值区主要集中在流域南部、中部和北部民勤绿洲地

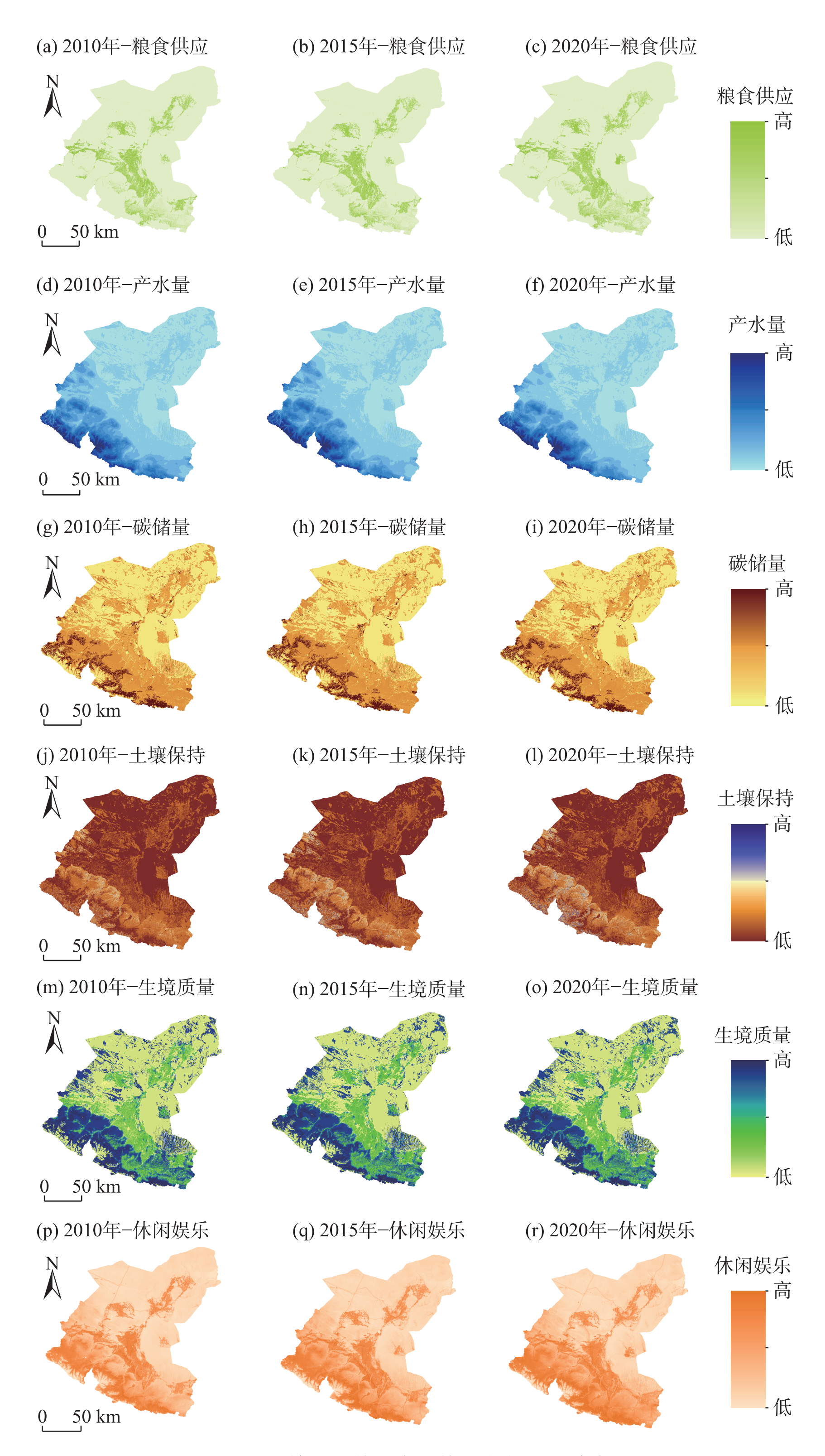


图2 石羊河流域生态系统服务的时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of ecosystem services in the Shiyang River Basin

区，多数ES高值区分布于流域南部，与众多研究成果比较一致[19-20,28]。主要是流域南部的海拔高，降雨丰富，年蒸发量小，分布着广袤的草原和森林，这些自然条件影响各类ES的分布格局。研究期间各类ES均得到不同程度的提高，这得益于一系列的生态治理(表3)。粮食供应、产水量、土壤保持和休闲娱乐4类ES显著增长，其中土壤保持增加了59%，产水量、粮食供应和休闲娱乐分别增加了38%、34%和19%。在2010、2015年和2020年碳储量总量分别为5.60×10^8 t、5.64×10^8 t、5.62×10^8 t，而生境质量平均得分为0.4572、0.4602、0.4576，生境质量和碳储量服务表现为较小的波动，总体上呈稳定状态。

2.2　不同尺度下生态系统服务权衡协同的差异

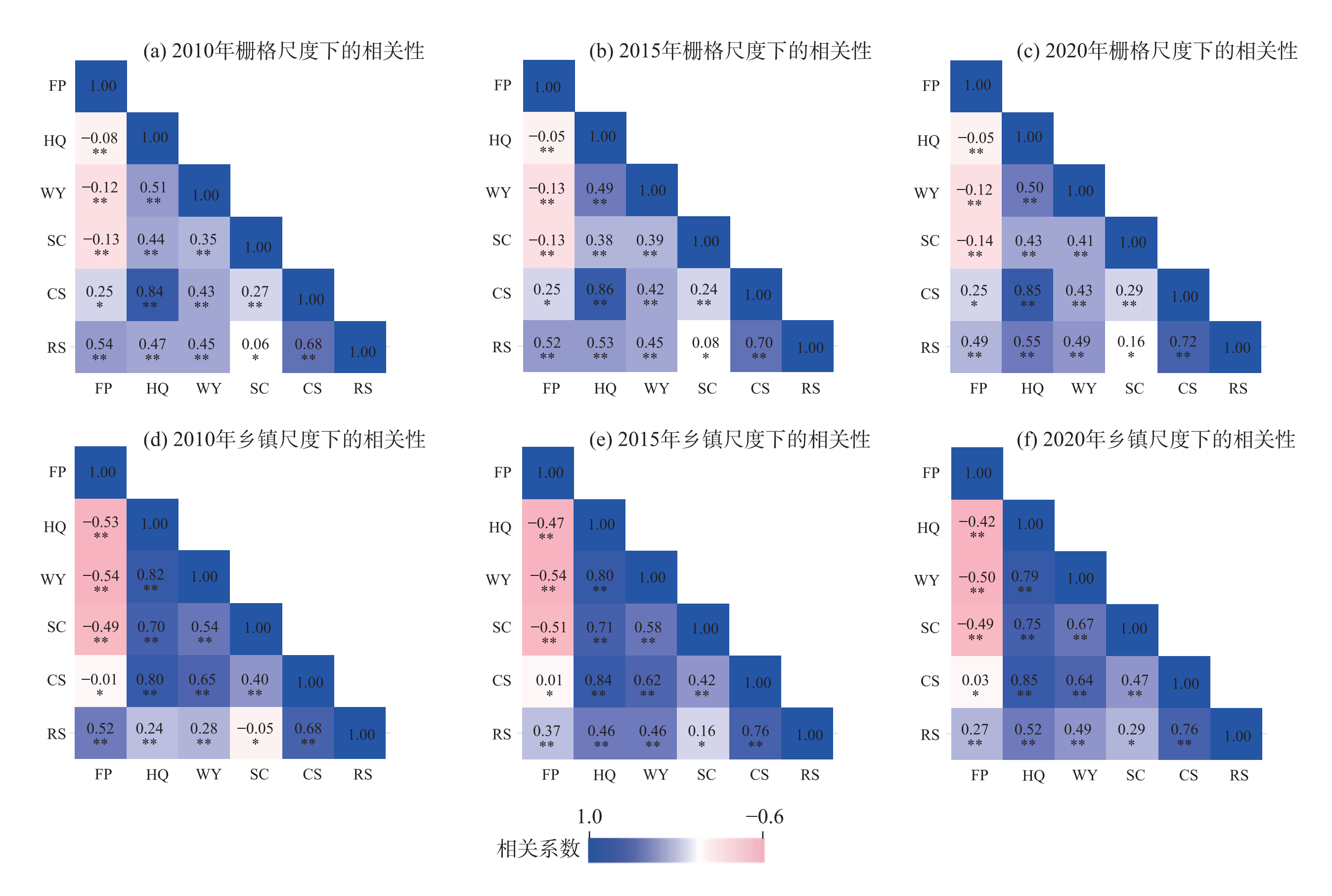
通过Pearson相关性分析在栅格和乡镇尺度上分别确定了6种ES之间的15对相关性关系(图3)。栅格尺度上，2010—2020年各服务间TOSs及彼此之间的变化是不同的，12对ES表现出协同关系，3对ES表现出权衡关系。在协同关系中，HQ-CS和CS-RS表现为强协同关系(r>0.6)，其中HQ-CS之间的协同关系是最强的(r>0.8)；7对ES(FP-RS、HQ-WY、HQ-SC、HQ-RS、WY-SC、WY-CS、WY-RS)表现为中协同关系(0.3<r<0.6)；3对ES(FP-CS、SC-CS、SC-RS)呈弱协同关系(0.0<r<0.3)。FP-HQ、FP-WY、FP-SC表现为弱权衡关系(−0.3<r<0.0)，且都与粮食

表3　2010—2020年石羊河流域生态系统服务统计

Tab. 3　Assessment of ecosystem services in the Shiyang River Basin from 2010 to 2020

年份	FP/t	WY/t	CS/t	SC/t	HQ	RS
2010	3.71×10^6	2.31×10^9	5.60×10^8	4.53×10^8	0.4572	3.35
2015	4.79×10^6	3.05×10^9	5.64×10^8	5.71×10^8	0.4602	3.84
2020	4.96×10^6	3.18×10^9	5.62×10^8	7.19×10^8	0.4576	3.97

注：FP为粮食供应；WY为产水量；CS为碳储量；SC为土壤保持；HQ为生境质量；RS为休闲娱乐。



注：*、**代表P<0.05、P<0.01。FP为粮食供应；WY为产水量；CS为碳储量；SC为土壤保持；HQ为生境质量；RS为休闲娱乐。下同。

图3　2010—2020年石羊河流域生态系统服务间的相关性

Fig. 3　Correlations between ecosystem services in the Shiyang River Basin from 2010 to 2020

供应有关。总之，在栅格尺度上，大多数ES之间的关系都比较稳定，而休闲娱乐与其他服务间的TOSs波动较大。乡镇尺度上，2010—2020年ES之间的TOSs在方向和强度上都发生了不同程度的变化，且与栅格尺度特征有所不同。在栅格尺度上表现为协同关系的12对ES依旧表现为协同关系。除SC-RS和FP-CS这两对ES是随着时间推移由弱权衡转为弱协同外。其余10对ES关系中，HQ-WY、HQ-SC、HQ-CS、WY-CS、CS-RS和WY-SC都为强协同关系，SC-CS、HQ-RS和WY-RS表现为中协同关系，FP-RS表现为弱协同关系。FP-HQ、FP-WY和FP-SC仍表现为权衡关系，与栅格尺度下相比，权衡关系更强。2个尺度下，乡镇尺度的TOSs普遍比栅格尺度的更强。

2.3 不同尺度下生态系统服务簇的时空变化

从栅格和乡镇尺度上识别出不同类型的ESB，其中栅格尺度上识别了4个服务簇(图4)，乡镇尺度上识别了6个服务簇(图5)。栅格尺度上，ESB呈现出不同的空间格局和组成特征(图4a、4c)。其中，B1和B3主要分布在流域的南部山区，B1的生态功能以WY和SC为主，B3则是以HQ和CS为主；B2分布在流域中部和北部民勤绿洲地区，主要以FP和RS为主；B4分布于流域中部和北部生态环境相对恶劣的地区，簇内各项服务供应比较低。图4c表明，2010—2020年B1和B2的面积分别增加了1024 km^2和912 km^2，B3和B4的面积减少了1374 km^2和562 km^2。其中，2010—2015年B1、B2面积增加，B3、B4面积减少，B1增加的面积主要由B3转变而来，B2增加的面积则是来源B3和B4转移；2015—2020年B1、B2和B4面积增加，B3面积继续减少，B1、B2和B4增加的面积除三者间的相互转移外，其余部分增量来自B3。

乡镇尺度上，ESB呈现出与栅格尺度上不同的特征。图5a显示了研究区117个乡镇6类ESB的空间分布情况，图5b为各类ESB的组成特征。分析表明，服务簇Bi、Biv、Bv分布于石羊河流域南部山区，

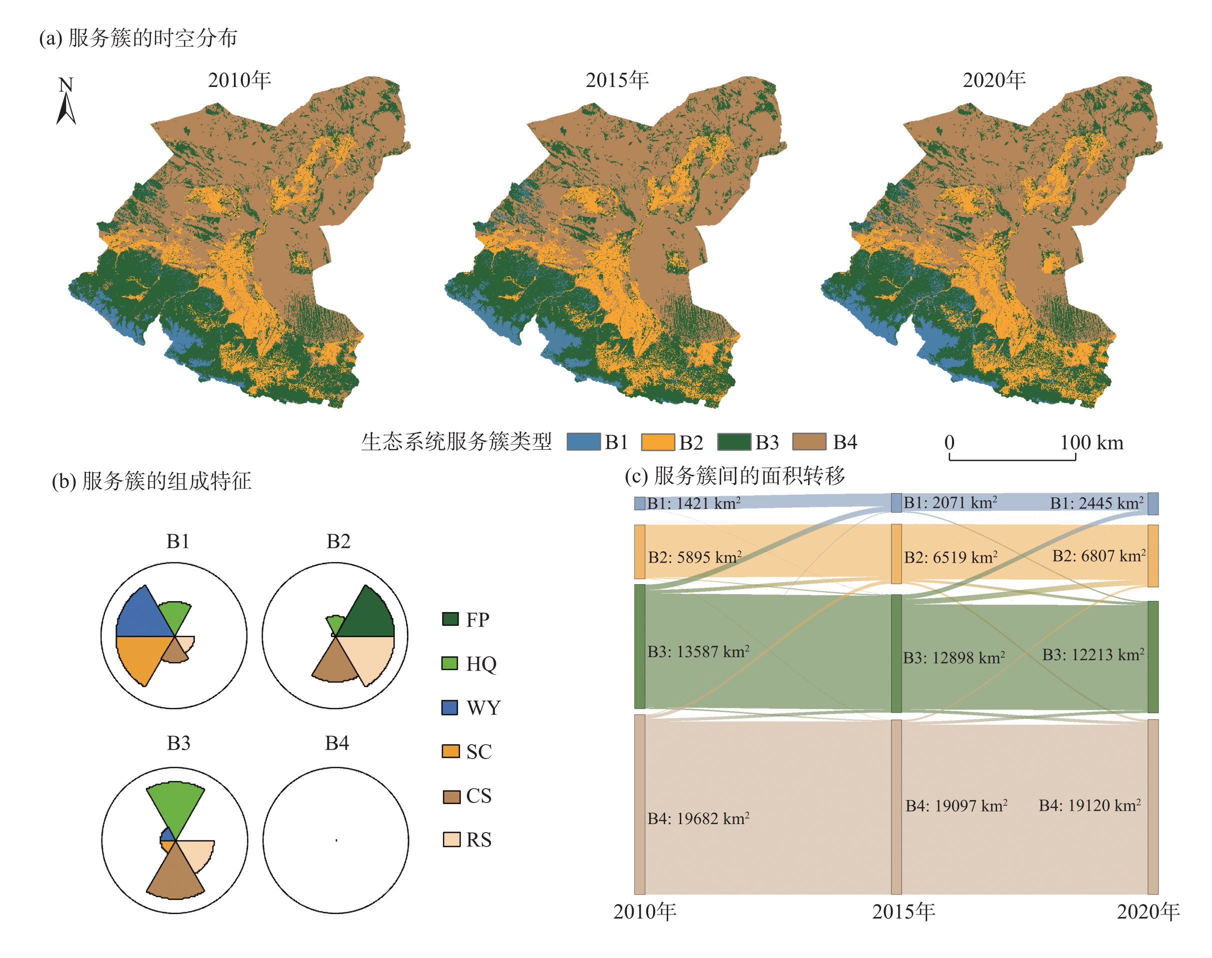


图4 2010—2020年石羊河流域栅格尺度上生态系统服务簇的时空变化

Fig. 4 Spatiotemporal variation of ecosystem service bundles at the grid scale in the Shiyang River Basin from 2010 to 2020

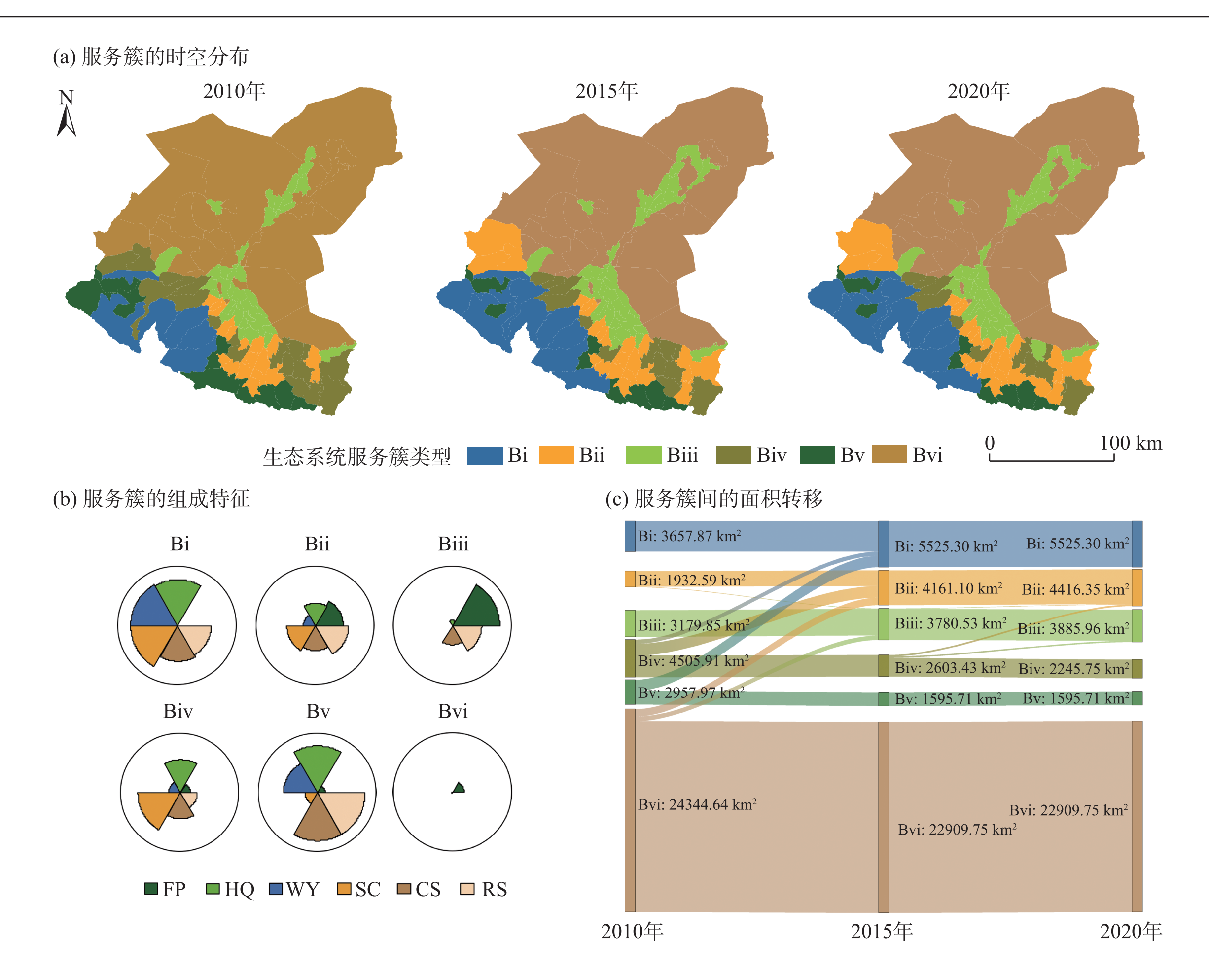


图5 2010—2020年石羊河流域乡镇尺度上生态系统服务簇的时空变化

Fig. 5 Spatiotemporal variation of ecosystem service bundles at the township scale in the Shiyang River Basin from 2010 to 2020

其中Bi为核心服务簇，主要是除FP外其他5种服务为主，Biv以SC为主，Bv以HQ、CS和RS为主；Bii和Biii分布在流域中部和北部民勤绿洲，Bii为过渡服务簇，具有过渡和衔接的作用，簇内无突出服务供应；Biii以FP为主；Bvi分布在流域中部、北部等地理环境相对恶劣的地区，分布最为广泛，簇内各项服务供应较低。图5c表明，2010—2015年，Bi、Bii、Biii的面积增加，Biv、Bv、Bvi的面积减少，这一阶段发生明显变化是Biv和Bvi转为Bii、Biii转为Bi；2015—2020年，各服务簇间面积无显著变化。可见，乡镇尺度上服务簇的转变主要发生在2010—2015年。同时，通过比较2个尺度下ESB的组成和分布情况，可以发现存在一些分布情况相似的服务簇，其中B4和Bvi、B2和Biii最为明显。

2.4 生态系统服务簇驱动力分析

通过增强回归树模型分析2010—2020年石羊河流域的土地利用类型(LULC)、归一化植被指数(NDVI)、降水量(PRE)、潜在蒸散发(PET)、海拔(DEM)、土壤类型(SOIL)、人口密度(POP)和国内生产总值(GDP)等因素对石羊河流域ESB的空间分异的影响，计算影响因子的相对贡献率(图6)。图6表明，不同

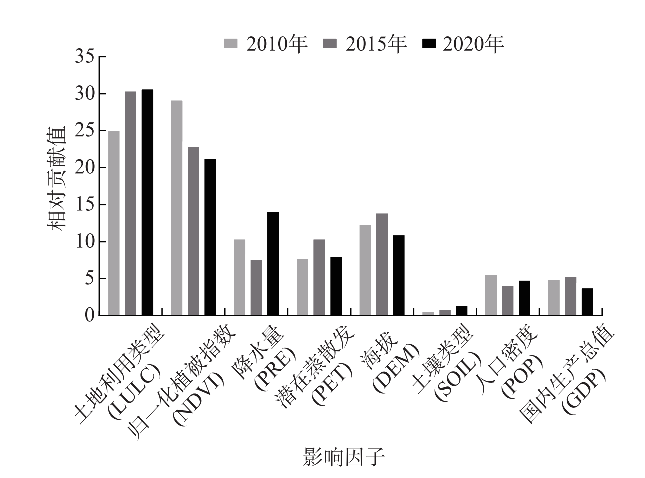


图6 2010—2020年石羊河流域生态系统服务簇各影响因子的相对贡献率

Fig. 6 Relative contribution rates of various impact factors of the ecosystem service bundles in the Shiyang River Basin from 2010 to 2020

年份影响因子的相对贡献率各不相同,其中2010年各驱动因子的相对贡献大小为:NDVI>LULC>DEM>PRE>PET>POP>GDP>SOIL。2015年各驱动因子相对贡献率为:LULC>NDVI>DEM>PET>PRE>GDP>POP>SOIL。与前2 a相比,2020年各驱动因子相对贡献率为:LULC>NDVI>PRE>DEM>PET>POP>GDP>SOIL。总体上看LULC、NDVI、PRE和DEM等因子对ESB的变化具有显著影响,4个影响因子的相对贡献率总和接近80%,表明这些因子对服务簇变化的解释能力强,相对重要性更高。其中LULC与NDVI的相对贡献率总和>50%。PET、SOIL、POP和GDP的影响程度较小,4个因子的相对贡献率总和约为20%,其对服务簇变化的解释能力较弱,相对重要性较小。

选取相对贡献率前4的影响因子,绘制其影响力变化图(图7),图中曲线的变化反映了各因子变动对服务簇的影响程度变化,边际效应数值越大,表明影响程度越大。从图7中可以看出,不同时间段的同一个变量对服务簇变化的响应趋势相似。在土地利用类型中,耕地对服务簇的影响程度是最大的,依次为草地、林地、水体和建筑用地,未利用地影响程度最小。归一化植被指数对服务簇的影响呈波动上升的,在NDVI值为0.2时,影响程度急剧上升。海拔对服务簇的影响随海拔的升高而增加,在海拔超过4000 m后保持稳定。不同年份的降水量存在差异,对服务簇的影响也略有不同。随降水量的增加,降水量对服务簇的影响程度逐渐增大,在到达一定程度后趋于相对稳定。

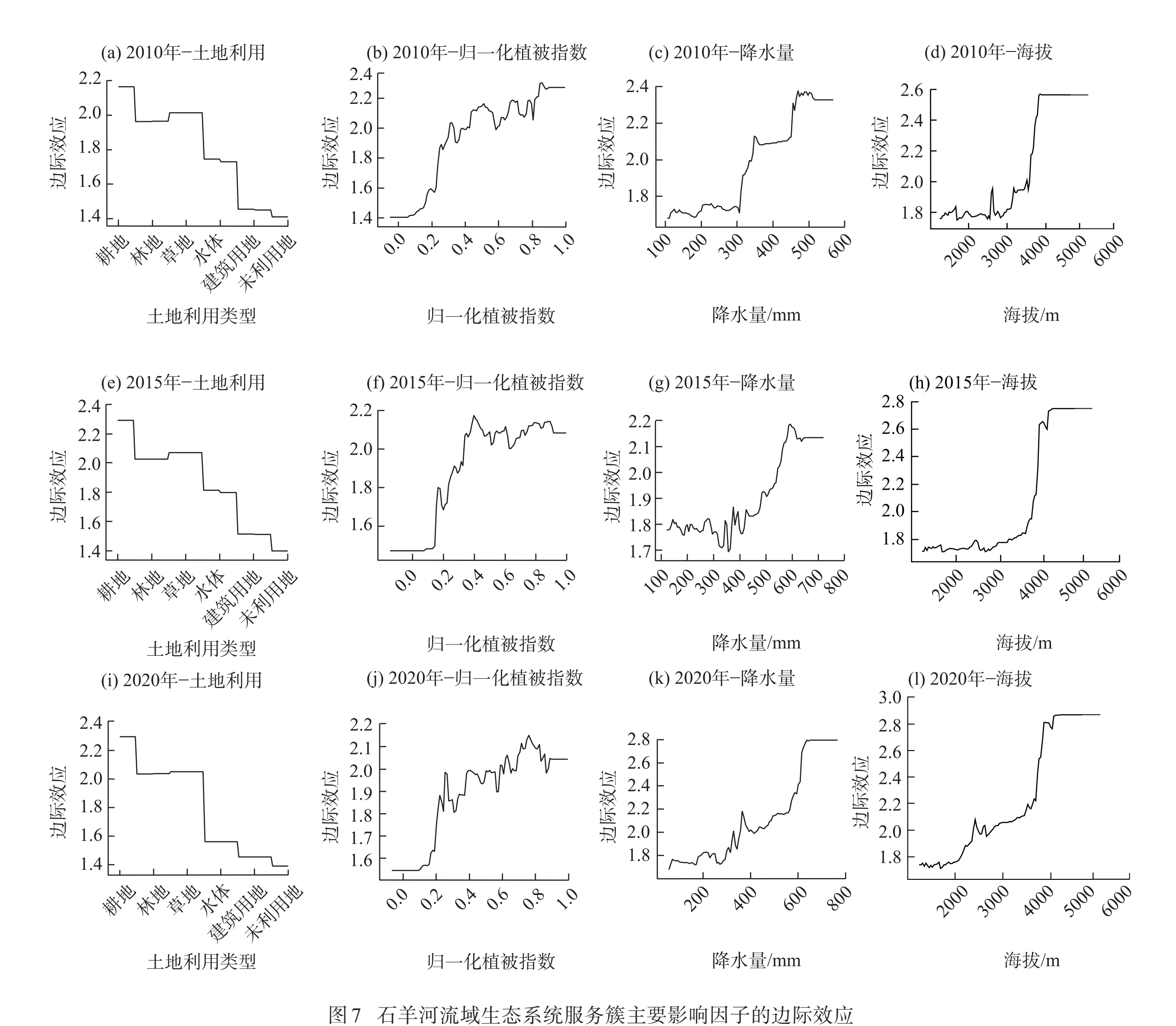


图7 石羊河流域生态系统服务簇主要影响因子的边际效应

Fig. 7 Marginal effects of main influencing factors of ecosystem service bundles in the Shiyang River Basin

3 讨 论

3.1 石羊河流域生态系统服务的时空变化

许多研究结果指出，ES的时空变化是由多种因素共同影响造成的[30]。本文分析了石羊河流域6种ES的时空变化，其中，WY、HQ、CS和SC呈相似的空间分布，服务供应的高值区主要分布在流域南部祁连山区。流域南部分布着广袤的森林和草原，提供了良好的栖息环境和大量的碳汇，并且还有较高的娱乐价值。同时森林和草原等植被根系可以增强土壤稳定性，有效降低水流和风力的侵蚀。南部地区的高海拔地形对潮湿气流的抬升，导致降雨量更丰富，相对较低的温度也使得蒸发量较弱。这些地形和气候条件促使了各ES空间分布格局的形成。流域中部和北部地势相对平坦、交通便利，分布其中的绿洲是流域主要的产粮区和人类生活区，FP和RS主要分布在这些地区。在流域的其他地区，由于生态环境相对恶劣，成为各项ES的低值区。2007年国务院批复《石羊河流域重点治理规划》，拉开了石羊河全域生态治理的序幕。通过加强上游地区（祁连山区）水源涵养，提高林草覆盖率，调整中游（河西走廊）用水结构，提高灌溉用水效率，同时避免人类活动对下游（民勤绿洲）的不良影响，减轻环境压力。经过一系列的生态治理措施，流域生态环境得到明显改善，各ES也得到了不同程度的增强。

3.2 石羊河流域生态系统服务相互作用的时空变化

厘清ES间复杂的相互作用是管理ES的基础，成功的ES管理需认识到ES相互作用的复杂性，还需将尺度效应纳入相关研究中[31-32]。在TOSs关系中，各种ES间TOSs在方向上多数保持不变，但TOSs强度有所不同，乡镇作为我国基层行政管理单位，涵盖了较大的地理范围，在乡镇层面的政策和制度往往更具体且针对性更强，为满足人类生产生活的需求，对生态系统进行符合社会生产的改造和利用，这种改造和利用涉及多个方面，导致了TOSs的强度更大。2个尺度上权衡关系主要发生在FP与WY、HQ、SC之间，这与其他研究结果一致[33-34]。导致这种结果的原因与土地利用冲突和农业灌溉用水有关，不合理的耕地扩张，促进粮食生产，可能会抑制调节服务。此外，石羊河流域地处典型干旱地区，水是发展农业的重要因素，粮食生产需要大量的水资源，致使这些服务间呈此消彼长的权衡关系。协同关系主要发生在调节服务、支持服务和文化服务之间，支持服务高的地区往往具有良好的植被覆盖条件，而良好的植被覆盖条件有助于促进地区的调节服务和文化服务，从而形成了3种服务间的协同关系。

作为一种系统的方法，ESB提供了在决策中平衡经济、生态和社会发展的框架，不同尺度的ESB的研究可以使差异化的政策管理应用到相关尺度[35]。栅格尺度上ESB研究能够从全域的视角来认识和评估ES；乡镇尺度的ESB研究可以更好地了解每个乡镇的ES特征和情况，为制定更符合乡镇生态保护和资源管理政策提供参考。通过有效的生态治理，流域内供给和调节服务明显改善，与之相关的ESB面积呈扩张趋势，表明流域内生态环境更加稳定并带来更多的生态收益。在ESB的研究中，栅格、流域和行政区划是进行ESB研究的主要研究尺度，栅格和流域尺度的研究对生态治理和政策制定方面具有一定优势，但与行政管理之间存在不匹配，针对这种情况，研究尺度逐渐拓展至行政单元，但目前主要关注为省域和县域的研究，对乡镇的研究比较少。乡镇作为我国的基层行政单位，开展乡镇尺度ESB的研究可根据乡镇的实际情况来制定政策。甚至一些研究已经延伸至村域尺度，表明基层行政单元尺度的研究更加符合当下的需要[36]。因此，考虑不同尺度间ES相互作用的差异，结合尺度效应对生态系统的规划和管理是必不可少的。

4 结 论

本文评估了2010、2015年和2020年石羊河流域6类ES的时空演变，分析栅格和乡镇尺度上各类ES间相互作用的时空变化以及石羊河流域ESB变化的驱动机制，主要结论如下：

（1）各类ES时空分异明显，WY、HQ、CS和SC4项服务呈“西南高-东北低”的分布格局，FP分布于流域中部和北部的耕地区，RS高值区则分布于流域南部以及中部和北部人类活跃的区域；研究期间内各类ES得到了不同程度的提高。

（2）栅格和乡镇尺度上TOSs的强度和方向存在差异，总体上表现为12对协同关系，3对权衡关系；2个尺度上TOSs差异主要表现为强度不同，乡

镇尺度的TOSs强度普遍强于栅格尺度。

(3) 栅格尺度上识别了4类ESB,乡镇尺度上识别了6类ESB,2个尺度上ESB的时空分异显著,存在明显的数量和空间转移变化;多种因素在ESB的变化中起着重要作用,土地利用类型、归一化植被指数、年降水量和海拔是影响石羊河流域ESB时空变化的重要驱动因子。

参考文献(References)

[1] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[2] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, et al. Science for managing ecosystem services: Beyond the millennium ecosystem assessment [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106 (5): 1305-1312.

[3] Carpenter S R, DeFries R, Dietz T, et al. Millennium ecosystem assessment: Research needs[J]. Science, 2006, 314(5797): 257-258.

[4] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 等. 生态系统服务功能管理研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 702-710. [Zheng Hua, Li Yifeng, Ouyang Zhiyun, et al. Progress and perspectives of ecosystem services management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 702-710.]

[5] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390. [Li Shuangcheng, Zhang Caiyu, Liu Jinlong, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography[J]. Geographical Research, 2013, 32(8): 1379-1390.]

[6] 李冬花, 张晓瑶, 王咏, 等. 新安江流域生态系统服务演化过程及权衡协同关系[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6981-6993. [Li Donghua, Zhang Xiaoyao, Wang Yong, et al. Evolution process of ecosystem services and the trade-off synergy in Xin'an River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6981-6993.]

[7] Wang Y, Dai E. Spatial-temporal changes in ecosystem services and the trade-off relationship in mountain regions: A case study of Hengduan Mountain region in southwest China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121573, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121573.

[8] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 89-104.

[9] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例[J]. 经济地理, 2020, 40(1): 93-102. [Ouyang Xiao, He Qingyun, Zhu Xiang. Simulation of impacts of urban agglomeration land use change on ecosystem services value under multi-scenarios: Case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2020, 40 (1): 93-102.]

[10] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services[J]. Ecosystem Services, 2013, 4: 117-125.

[11] 张春悦, 白永平, 杨雪荻, 等. 多情景模拟下宁夏平原生态系统服务簇识别研究[J]. 地理研究, 2022, 41(12): 3364-3382. [Zhang Chunyue, Bai Yongping, Yang Xuedi, et al. Identification of ecosystem service bundles in Ningxia Plain under multi-scenario simulation[J]. Geographical Research, 2022, 41(12): 3364-3382.]

[12] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(11): 5242-5247.

[13] 胡宇霞, 龚吉蕊, 朱趁趁, 等. 基于生态系统服务簇的内蒙古荒漠草原生态系统服务的空间分布特征[J]. 草业学报, 2023, 32 (4): 1-14. [Hu Yuxia, Gong Jirui, Zhu Chenchen, et al. Spatial distribution of ecosystem services in the desert steppe, Inner Mongolia based on ecosystem service bundles[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(4): 1-14.]

[14] Chen T, Feng Z, Zhao H, et al. Identification of ecosystem service bundles and driving factors in Beijing and its surrounding areas[J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 134687, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134687.

[15] 宋家鹏, 陈松林. 基于生态系统服务簇的福州市生态系统服务格局[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1045-1053. [Song Jiapeng, Chen Songlin. Ecosystem service pattern of Fuzhou City based on ecosystem service bundles[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1045-1053.]

[16] Zhang T, Zhang S, Cao Q, et al. The spatiotemporal dynamics of ecosystem services bundles and the social-economic-ecological drivers in the Yellow River Delta region[J]. Ecological Indicators, 2022, 135: 108573, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108573.

[17] 杨亮洁, 王晶, 魏伟, 等. 干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化——以石羊河流域为例[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 5915-5927. [Yang Liangjie, Wang Jing, Wei Wei, et al. Ecological security pattern construction and optimization in arid inland river basin: A case study of Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 5915-5927.]

[18] 张自正, 张蕾, 孙桂英, 等. 清江流域生态系统服务权衡时空效应及驱动因素[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 1051-1062. [Zhang Zizheng, Zhang Lei, Sun Guiying, et al. Spatial and temporal effect and driving factors of ecosystem service trade-off in the Qingjiang River Basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(4): 1051-1062.]

[19] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7582-7595. [Wang Bei, Zhao Jun, Hu Xiufang. Analysison trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7582-7595.]

[20] 韩楚翘, 郑江华, 王哲, 等. 基于PLUS-InVEST模型吐哈盆地陆

地生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J]. 干旱区地理, 2024, 47(2): 260-269. [Han Chuqiao, Zheng Jianghua, Wang Zhe, et al. Spatiotemporal variation and multiscenario simulation of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Turpan-Hami Basin based on PLUS-InVEST model[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(2): 260-269.]

[21] 秦伟, 朱清科, 张岩. 基于GIS和RUSLE的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 157-163, 5. [Qin Wei, Zhu Qingke, Zhang Yan. Soil erosion assessment of small watershed in Loess Plateau based on GIS and RUSLE[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 157-163, 5.]

[22] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1125-1136. [Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1125-1136.]

[23] 王良杰, 马帅, 许稼昌, 等. 基于生态系统服务权衡的优先保护区选取研究——以南方丘陵山地带为例[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1716-1727. [Wang Liangjie, Ma Shuai, Xu Jiachang, et al. Selection of priority protected region based on ecosystem service trade-offs: A case study of the southern hill and mountain belt, China[J]. Act Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1716-1727.]

[24] Qiu J, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(29): 12149-12154.

[25] Kohonen T. The self-organizing map[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(9): 1464-1480.

[26] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. Journal of Animal Ecology, 2008, 77(4): 802-813.

[27] Wang S, Tan X, Fan F. Landscape ecological risk assessment and impact factor analysis of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4726, doi: 10.3390/rs14194726.

[28] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 等. 生态系统服务综合关系空间分异及驱动因素——以石羊河流域为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 274-284. [Wang Yuchun, Zhao Jun, Fu Jiewen, et al. Recognition of ecosystem services trade-offs and synergistic comprehensive relations[J]. Research of Soiland Water Conservation, 2023, 30(2): 274-284.]

[29] 王波, 杨太保. 1980—2018年银川市生态系统服务价值评价及驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 552-564. [Wang Bo, Yang Taibao. Value evaluation and driving force analysis of ecosystem value in Yinchuan City from 1980 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 552-564.]

[30] Huang J, Zheng F, Dong X, et al. Exploring the complex trade-offs and synergies among ecosystem services in the Tibet Autonomous Region[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384: 135483, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135483.

[31] Xia H, Yuan S, Prishchepov A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: Implications for spatial planning and management[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 189: 106767, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106767.

[32] Sun Y, Li J, Liu X, et al. Spatially explicit analysis of trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in Shaanxi Valley Basins[J]. Forests, 2020, 11(2): 209, doi: 10.3390/f11020209.

[33] Saidi N, Spray C. Ecosystem services bundles: Challenges and opportunities for implementation and further research[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(11): 113001, doi: 10.1088/1748-9326/aae5e0.

[34] Mouchet M A, Paracchini M L, Schulp C J E, et al. Bundles of ecosystem (dis) services and multifunctionality across European landscapes[J]. Ecological Indicators, 2017, 73: 23-28.

[35] Liao Q, Li T, Wang Q, et al. Exploring the ecosystem services bundles and influencing drivers at different scales in southern Jiangxi, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110089, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110089.

[36] 刘迪, 陈海, 荔童, 等. 黄土丘陵沟壑区村域生态系统服务簇的时空分异及其地形梯度分析[J]. 地理科学进展, 2022, 41(4): 670-681. [Liu Di, Chen Hai, Li Tong, et al. Spatiotemporal differentiation of village ecosystem service bundles in the loess hilly and gully region and terrain gradient analysis[J]. Progress in Geography, 2022, 41(4): 670-681.]

Spatiotemporal changes and driving mechanism of ecosystem service interactions in the Shiyang River Basin

HU Feipeng, ZHAO Jun, SUN Ziyun, LIU Jian, TUO Rui

(College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: Understanding the spatiotemporal distribution and the internal complex relationships of ecosystem services is essential for their management. With the Shiyang River Basin, Gansu Province, China as the research area, six ecosystem services were evaluated in 2010, 2015, and 2020. The trade-off/synergy of ecosystem services and the spatial changes of service bundles on the grid and township scale were analyzed, and a boosted regression tree model was used to analyze the driving mechanism of ecosystem service bundles in the research area. The results showed the following: (1) The spatial differences of various services were obvious. The spatial pattern of water yield, carbon storage, soil conservation, and habitat quality was "southwest high-northeast low". Food production was mainly distributed in the farming areas in the north-central part of the basin, and the high-value areas of recreational service were distributed in the southern areas and the central parts of the basin and in densely populated areas in the north. During the research period, all kinds of services were improved to varying degrees, with the increase in soil conservation having the largest improvement and the increase in carbon storage and habitat quality having the smallest. (2) The trade-offs and synergies of ecosystem services on two scales showed similarities, but their intensities were different. Overall, there were twelve pairs of synergy and three pairs of trade-off relationships. (3) The spatial patterns of ecosystem service bundles on two scales were similar. In addition to food production, there were five service-related service bundles in the southern part of the river basin. In the central and northern Minqin oasis areas of the basin, there were service bundles related to food production and recreational service. The ecological environment in other areas was relatively harsh. There was no outstanding service supply in the service bundles, but there were obvious changes in the number and space transfer of service bundles during the study period. (4) Many factors played an important role in the changes in ecosystem service bundles in the research area, and the impact factors were slightly different in different years. Among them, land use type, normalized difference vegetation index, annual precipitation, and altitude were the main drivers of the changes in ecosystem service bundles.

Key words: ecosystem service bundle; trade-offs and synergies; boosted regression tree model; Shiyang River Basin